

文章编号: 1000-7598-(2006) 09-1505-04

空化射流在岩石破碎中的作用实验研究

向文英¹, 卢义玉², 李晓红², 李 倩², 冯欣艳²

(1.重庆大学 城市建设与环境工程学院, 重庆 400045; 2.重庆大学 资源与环境科学学院, 重庆 400044)

摘 要: 在研究空泡云形成过程的基础上, 总结了空泡云长度随泵压、围压的变化规律, 指出空泡云长度随泵压增加而增加, 随围压的增加, 存在一最优的围压值, 此时空泡云长度最大。论证了缩放型喷嘴与收缩型喷嘴在岩石破碎中的冲蚀性能差异, 指出在相同泵压下缩放型喷嘴产生的空化射流对岩石质量冲蚀能力平均是收缩型喷嘴的 7 倍, 同时指出随着围压的增大, 缩放型喷嘴对岩石的冲蚀深度、切缝直径、冲蚀质量相应减少, 对岩石冲蚀性能产生不利影响。

关 键 词: 空泡云; 冲蚀性能; 岩石破碎

中图分类号: TU 458

文献标识码: A

Experimental study of the function of cavitating water jet on rock-cutting

XIANG Wen-ying¹, LU Yi-yu², LI Xiao-hong², LI Qian², FENG Xin-yan²

(1.College of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China

2. College of Resources and Environmental Science, Chongqing University, Chongqing, 400044, China)

Abstract: It was summarized for the length of cavitation cloud versus different nozzles with different pump pressures and ambient pressures based on the forming process of cavitation cloud. It is pointed out that the length of cavitation cloud increases with pump pressures, while there has a best one with ambient pressures. The difference of erosion characteristic between converging-diverging nozzle and converging nozzle was analysed by experiment; and it is shown that the capability of average mass rock-erosion by cavitating water jet with converging-diverging nozzle are 7 times than converging nozzle in the same bump pressure. In contrast, it is shown that the depth and the diameter of erosion as well as mass erosion decrease with the increasing of ambient pressure; so that the influence on rock-erosion capability with converging-diverging nozzle in ambient pressure is disadvantageous.

Key words: cavitation cloud; erosion capability; rock-erosion

1 前 言

高压水射流技术已在清洗、切割、石油钻孔、海洋开发中得到广泛的应用。与普通高压水射流相比, 空化射流将促进射流进行低能高效的工作, 并能明显提高清洗效果、切割效率和满足钻深孔大孔的目的, 在海底资源的开发中具有重大的应用价值^[1~5]。为此, 本文设计了不同型式的喷嘴, 对其产生的空泡云进行对比分析和岩石冲蚀实验研究。

2 实验装置与仪器

实验设计了如图 1 所示的空化射流实验装置, 采用全密封的高压容器模拟深水环境, 其上设有压力表、减压阀、排水阀, 前后观察窗口、并由进水管与高压柱塞泵连接。高压柱塞泵最大压力

31.5 MPa, 流量 750 L/h。实验采用 500 万像素的数码相机、尼康高速照相机摄取空泡云图片, 闪光灯从后观察窗口输入光源, 高速照相机拍摄速度 5 000 fps。

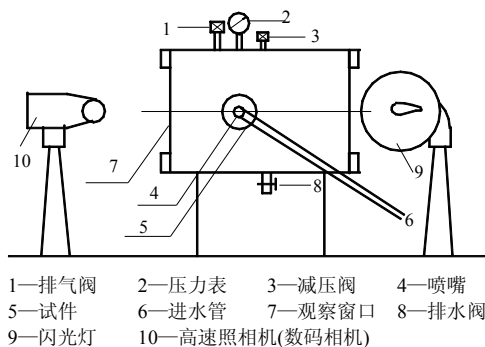


图 1 空化射流实验装置图

Fig.1 Sketch of cavitation water jet experimentation

收稿日期: 2005-10-12

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(No.50334060)

作者简介: 向文英, 女, 1965 年生, 博士, 讲师, 主要从事流体力学与高压水射流理论教学及科学研究工作。E-mail: xwy829@126.com

实验设计的缩放型空化喷嘴收缩角为 15° ，扩散角 18° ，喉管直径 1 mm，如图 2 (a)。为分析比较，实验还设计了相同收缩角度的普通收缩喷嘴，其出口喷嘴直径为 1 mm，如图 2 (b)。

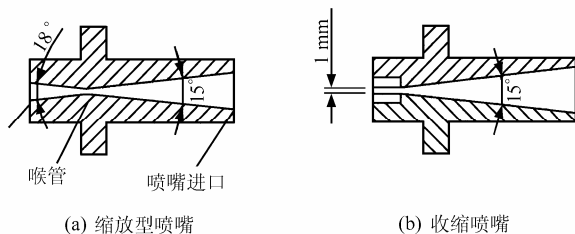


图 2 喷嘴的结构形式
Fig.2 Sketch of nozzles structure

3 空泡云发育与空泡云长度实验研究

3.1 空泡云发育分析

空化喷嘴是产生空化水射流的源泉^[2]，其空化能力的强弱取决于喷嘴形状、来流紊动强弱、速度、系统压力、流体性质等因素。空化水射流冲蚀能力强弱受制于空泡云的发育状况。空泡云的产生、发育、溃灭反映在空泡云的长短、大小的变化上，是岩石破坏的关键所在。在缩放型喷嘴中，空化常发生于压强最低的喉管部位，这里流速最大，压强低于汽化压强。喉管处产生的空泡很快被高速水体带走，并跟随射流运动，与水体形成液气混合物，从而形成空泡云。空泡云形成后射流密度、黏性系数都将受到影响而发生变化，有：

$$\rho = \alpha_l \rho_l + \alpha_g \rho_g \quad (1)$$

$$\mu = \alpha_l \mu_l + \alpha_g \mu_g \quad (2)$$

式中 ρ ， ρ_l ， ρ_g 分别为混合体、液体、空泡的密度； α_l ， α_g 分别为液体、空泡的体积分数； μ ， μ_l ， μ_g 分别为混合体、液体、空泡的动力黏性系数。

由此可见，空化射流形成后其密度减少、黏性减弱，有利于空泡的发育，空泡不断地经历膨胀、压缩、再膨胀、再压缩，乃至溃灭的反复过程。实验中采用了数码相机，对收缩喷嘴与缩放型喷嘴在不同围压、泵压条件下的空泡云进行了摄影。收缩喷嘴在围压 0.9 MPa，泵压 18 MPa 下，采用数码相机拍摄的空化云如图 3。

缩放型喷嘴在围压 0.9 MPa，泵压 14 MPa 下，数码相机拍摄的空泡云如图 4。

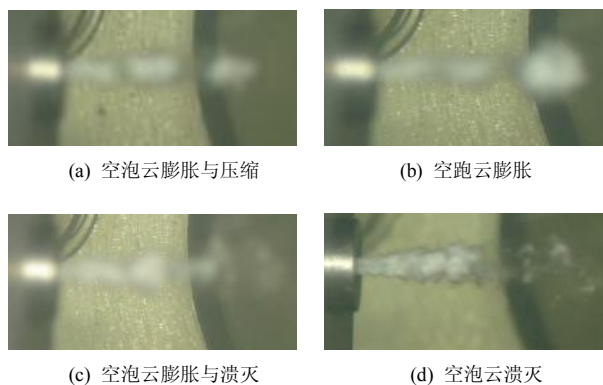


图 3 收缩喷嘴空泡云的发育溃灭过程图
Fig.3 The growth and collapse of cavitation cloud in the converging nozzles

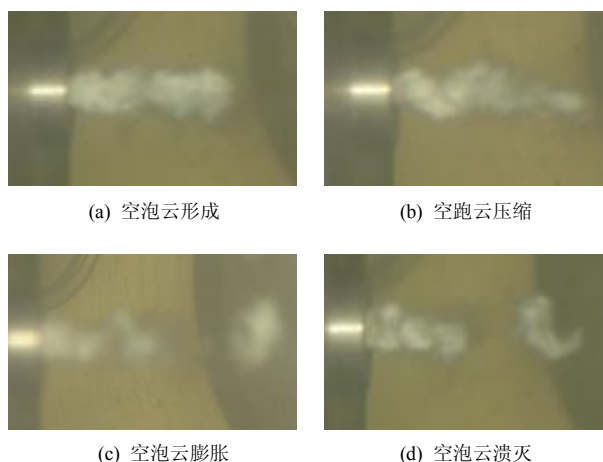


图 4 缩放型喷嘴空泡云的发育溃灭过程图
Fig.4 The growth and collapse of cavitation cloud in converging-diverging nozzle

图 3、4 中，不难发现，空泡云的发育过程都经历了空泡云的膨胀、压缩、再膨胀、再压缩、直至溃灭的几个过程。收缩喷嘴的空泡云发育过程主要受泵源脉动影响，膨胀、压缩明显。相反，缩放型空化喷嘴则空泡数量更多，黏性减弱，振荡剧烈，空泡溃灭速度加快，空泡破灭产生的冲击力将更大。

3.2 空化水射流空泡云长度实验研究

空泡云的长短是射流能量大小的直接体现，空泡云长度是空化射流冲蚀性能的关键性指标，它直接决定着岩石试件的冲蚀体积与有效靶距的长短。文献[1]中，证明了空泡云长度等于靶距和切割深度之和，即当泵压、围压一定时，空泡云长度与有效靶距、切割深度成正比。然而，空泡云长度又将受到那些因素的影响？本文在实验中对缩放型空化喷嘴与普通收缩型喷嘴在不同泵压力和围压下进行了实验，通过高速照相机获得图片，利用高速照相机的 MotionCentral 软件平台下的坐标，由已知的喷嘴

外径, 计算出空泡云长度, 取 3 次实验平均值。

实验中, 缩放型空化喷嘴喉管直径 $d_1 = 1 \text{ mm}$, 下游喷嘴直径比 $d_2/d_1 = 3.6$; 普通收缩喷嘴直径 $d = 1 \text{ mm}$; 选用围压 0.9 MPa 。高速照相机拍摄速度 $5\,000 \text{ fps}$, 像素 640×480 。实验获得泵压对空泡云长度的影响关系曲线, 如图 5。

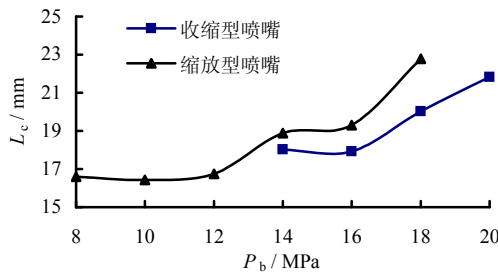


图 5 泵压与空泡云长度关系曲线

Fig.5 Pump pressure versus cavitation cloud

图 5 中, L_c 为空泡云长度, P_b 为系统泵压。由图 5 可知, 缩放型空化喷嘴在相同围压下, 空泡云长度随泵压的增加而增加, 在泵压小于 12 MPa 时, 变化较缓, 之后有一较大变化区, 在 $14 \sim 16 \text{ MPa}$ 又开始缓慢变化, 16 MPa 后又形成较大变化区。对于普通收缩喷嘴, 对比实验发现, 空泡云长度变化规律与缩放型空化喷嘴相同, 只是随泵压增加空泡云长度变化相对较缓。以 18 MPa 为例, 缩放型空化喷嘴空泡云长度较收缩型喷嘴提高 15% 。

对上述缩放型空化喷嘴, 在系统泵压 $P_b = 18 \text{ MPa}$ 下, 改变围压, 实验获得了围压对空泡云长度影响的关系曲线, 见图 6。

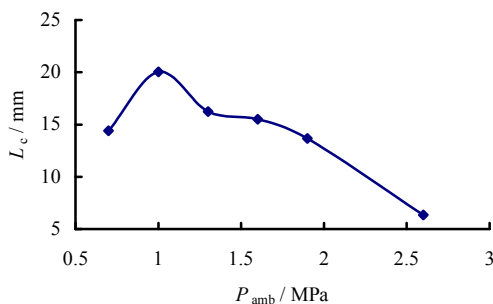


图 6 围压与空泡云长度关系曲线

Fig.6 Ambient pressures versus cavitation cloud

图 6 中, P_{amb} 为高压容器的压力, 即围压。图中可知, 在相同的系统泵压下, 曲线出现随着围压的增加, 空泡云长度先是增加, 在围压为 1 MPa 时

空泡云长度达到最大, 之后随着围压的增加空泡云长度逐渐减小。

4 岩石冲蚀性能的影响分析

在砂岩的冲蚀实验中, 冲蚀深度、宽度用游标卡尺直接测量。冲蚀质量采用冲蚀前后烘干、称重取得。试验所用的各种测量仪表都具有足够的精度, 并经常进行校准, 每个环节的试验和测量条件一致, 以保证重复多次测量的准确。每个喷嘴的冲蚀试验进行 3 次, 对于多次重复的试验结果, 按狄克逊准则进行分析处理。

4.1 泵压对岩石冲蚀质量的影响

实验在围压 $P_{amb} = 0.9 \text{ MPa}$ 、有效靶距直径比为 6 mm 、冲蚀时间为 3 min 的实验条件下, 分别对缩放型空化喷嘴、普通收缩型喷嘴进行了岩石的冲蚀性能实验。试件采用直径 500 mm , 厚 30 mm 的砂岩, 砂岩抗压强度为 93.15 MPa 。实验结果见图 7。

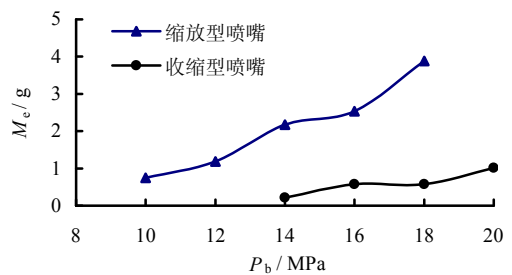


图 7 泵压与冲蚀质量关系曲线

Fig.7 Pump pressure versus erosion mass

图 7 中, M_c 为砂岩的冲蚀质量。由图可知, 在相同的围压、靶距、冲蚀时间下, 砂岩的冲蚀质量随泵压增加而增加, 无论是缩放型空化喷嘴或普通收缩型喷嘴, 均具有相同的规律, 但缩放型空化喷嘴的岩石冲蚀质量均较普通收缩型喷嘴大。对比分析结果显示: 在相同条件下, 缩放型空化喷嘴比普通收缩型喷嘴具有更高的冲蚀能力, 对砂岩的冲蚀质量平均是普通射流的 7 倍。此实验结果与空泡云发育过程中空泡云长度的变化结果是一致的。即一方面, 缩放型空化喷嘴产生的空泡数量占有绝对的优势。另一方面, 空泡云长度也反映了缩放型空化喷嘴产生的空化射流在能量上的优势。

4.2 围压对冲蚀性能的影响

在泵压 $P_b = 18 \text{ MPa}$, 其他参数不变, 改变围压条件, 缩放型空化喷嘴对砂岩的冲蚀实验结果如图 8。

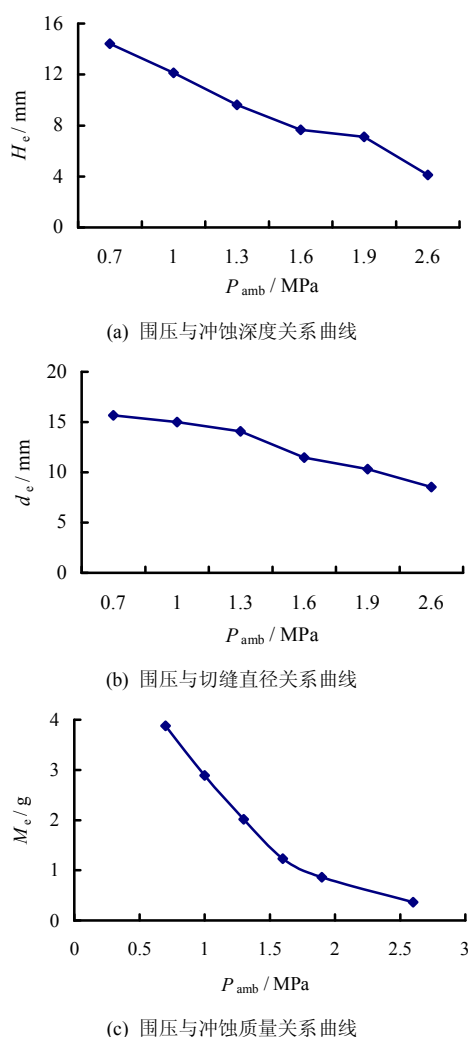


图8 围压对冲蚀性能的影响

Fig8 Variation of erosion capability with P_{amb}

图8中, H_e 为砂岩的冲蚀深度, d_e 为砂岩的切缝直径。图8(a), (b), (c)分别为围压与冲蚀深度关系曲线、围压与切缝直径关系曲线、围压与冲蚀质量关系曲线, 3条曲线变化趋势一致。即在相同的泵压、有效靶距直径比和冲蚀时间下, 砂岩冲蚀深度、切缝直径与冲蚀质量的变化曲线随着围压的增加而逐渐下降, 在围压大于1.6 MPa后, 三条曲线随着围压的增加, 下降的趋势变慢。各条曲线基本成分段线性分布, 当围压达2.6 MPa时, 切割能力已较微弱。

5 结论

空泡云的发育过程经历了空泡云的膨胀、压缩、再膨胀、再压缩、直至溃灭几个过程。本实验条件下, 空化射流在岩石切割实验中, 得到以下的结论:

(1) 在相同围压下, 空泡云长度随泵压的增加而增加。缩放型空化喷嘴与普通收缩型喷嘴空泡云长度具有相同的变化规律, 但随泵压增加, 缩放型空化喷嘴空泡云长度增加相对较快。

(2) 缩放型空化喷嘴泵压不变, 空泡云长度随着围压的增加, 在围压为1 MPa时空泡云长度达到最大, 之后随着围压的增加, 空泡云长度逐渐减少。

(3) 对砂岩的冲蚀实验表明, 在相同的实验条件下, 缩放型空化喷嘴产生的空化射流比普通收缩型喷嘴具有更强的冲蚀能力, 对砂岩的质量冲蚀能力平均是普通收缩型喷嘴的7倍。这将有利于空化水射流的实际应用。

(4) 缩放型空化喷嘴产生的空化水射流对砂岩的冲蚀深度、切缝直径与冲蚀质量均随着围压的增加而逐渐减少, 当围压达2.6 MPa时, 切割能力已较微弱。

参考文献

- [1] 卢义玉, 李晓红, 向文英. 空化水射流破碎岩石的机理研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(8): 1 233—1 237.
LU Yi-yu, LI Xiao-hong, XIANG Wen-ying. Rock erosion mechanisms of cavitating water jets[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(8): 1 233—1 237.
- [2] Jun Ishimoto, Kenjiro Kamijo. Numerical analysis of cavitating flow of liquid helium in a converging-diverging nozzle[J]. **Journal of Fluids Engineering**, 2003, 125: 749—757.
- [3] Leroux J B, Astolfi J A, Billard J Y. An experimental study of unsteady partial cavitation[J]. **Journal of Fluids Engineering**, 2004, 126: 94—101.
- [4] Soyama H, Tokumitsu K, Nishida M. High-speed observations of the cavitation cloud around a high-speed submerged water jet[J]. **JSME International Journal, Series B**, 1995, 38(2): 245—251.
- [5] 朱美洲, 胡寿根. 锥型喷嘴结构参数及淹没空化水射流冲蚀性能的实验研究[J]. 水动力学研究与进展, 1998, 13(3): 263—270.
ZHU Mei-zhou, HU Shou-gen. Study on the conical nozzle configuration and the performance of submerged cavitating water jets[J]. **Journal of Hydrodynamics**, 1998, 13(3): 263—270.